

## Численные исследования деформирования пористого гранулированного слоя при квазистатическом и импульсном сжатии

Кочетков Анатолий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор;

Леонтьев Николай Васильевич, кандидат технических наук, доцент;

Турыгина Инна Александровна, кандидат физико-математических наук;

Модин Иван Александрович, младший научный сотрудник.

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород, Россия)

**Аннотация.** *Насыпные слои из металлических шариков являются перспективным элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. При высоких параметрах воздействия гранулированные слои, как высокопористые среды, могут деформироваться необратимым образом. В ранее проведенных экспериментах сжатия гранулированных слоев из свинцовых шариков выявлено существенное отличие динамических диаграмм деформирования от статических. С целью определения причин отличия проведено численное моделирование нагружения симметричного фрагмента слоя из свинцовых шариков при квазистатической и динамической нагрузках. Численные диаграммы деформирования, как и экспериментальные, являются существенно нелинейными и необратимыми. Поведение численных кривых качественно соответствует поведению экспериментальных. Существенное влияние на отличие поведения статических и динамических диаграмм деформирования пористого слоя оказывают два основных фактора: ограниченное время действия нагружающего импульса в динамическом режиме и отличие динамической диаграммы деформирования базового материала (свинца при высокой скорости деформации) от статической диаграммы.*

**Ключевые слова:** *слой шариков, симметричный фрагмент, численное моделирование, статика, динамика, деформация, сжатие, нелинейность, необратимость.*

### Введение

Насыпные слои являются перспективным элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий [1-3]. В научной литературе существует небольшое количество работ, посвященных исследованию деформируемых пористых насыпных слоев в виде шариков или гранул. Полученные результаты ограничиваются малыми нагрузками, которые не вызывают развитие пластического течения или разрушение материала шариков [4, 5]. В проведенных в последнее время экспериментальных исследованиях сжатия гранулированных слоев из свинцовых шариков были получены высокие степени сжатия, вызывающие развитие упругопластического течения материала, как в квазистатическом, так и в динамическом режимах нагружения [6, 7]. По результатам экспериментов были построены кривые напряжение-деформация для слоя из свинцовых шариков (рис. 1, для динамического нагружения - кривая 1; для квазистатического нагружения - кривая 2). С увеличением деформации возрастает отличие динамической диаграммы деформирования от квазистатической. На динамической диаграмме помимо участков нагружения, полученных в результате сжатия образца прямыми волнами от ударяемого стержня, видны участки разгрузки в результате действия отраженных волн напряжения от торца нагружающего стержня при отскоке ударника (методика Кольского с разрезным стержнем Гопкинсона [8]). Таким образом, происходит процесс динамического нагружения образца в несколько циклов с разгрузками в течение одного эксперимента. Разгрузочные кривые, как и в квазистатическом случае (рис. 1), близки к прямым линиям. Значение модуля разгрузки и в квазистатическом, и в динамическом режимах нагружения находятся в интервале от 1 до 6 ГПа.

Наблюдается (рис. 1) существенное отличие динамических диаграмм деформирования от статических. Кривые при всех режимах нагружения носят нелинейный и необратимый характер, при высоких нагрузках происходит сильное пластическое течение материала.



Рис. 1. Экспериментальные диаграммы деформирования

В данной работе численными методами исследуются факторы, влияющие на сильное отличие динамических диаграмм деформирования гранулированного слоя от статических. Среди этих факторов:

- ограниченное время действия нагружающего импульса в динамическом режиме;
- отличие статической диаграммы деформирования базового материала (свинца) от динамической диаграммы.

### Результаты численного моделирования

В целях определения особенностей деформирования слоя при развитии пластического течения, проводится математическое моделирование сжатия отдельного симметричного фрагмента слоя. Предполагается, что все шарики одинакового размера и идеальной шаровой формы. Для численного моделирования деформирования гранулированного слоя была выбрана ячейка симметрии, когда центры шариков образуют куб (рис. 2), в этом случае объемное содержание пор  $\alpha_1=0,48$ ; ( $\alpha_1 = V_{\text{пор}}/V_{\text{полн}}$  где  $V_{\text{пор}}$  - объем пор,  $V_{\text{полн}}$  - объем всей ячейки симметрии). Реальные гранулированные слои, ввиду наличия неидеальной формы, некоторого разброса размеров шариков, способа

укладки и т.д. имеют, как правило, другие значения объемного содержания пор, например в экспериментах [9] объемное содержание пор составляло  $\alpha_1=0,39$ . С точки зрения протекающих процессов есть основания полагать, что и для кубической ячейки симметрии можно получить реалистическую оценку вклада различных факторов, отличающихся динамические режимы нагружения слоя от квазистатических.



Рис. 2. Кубическая укладка шариков в слое

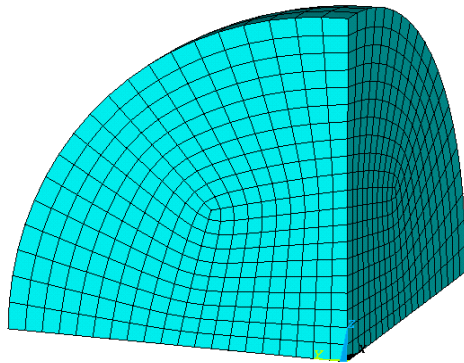


Рис. 3. Расчетная область

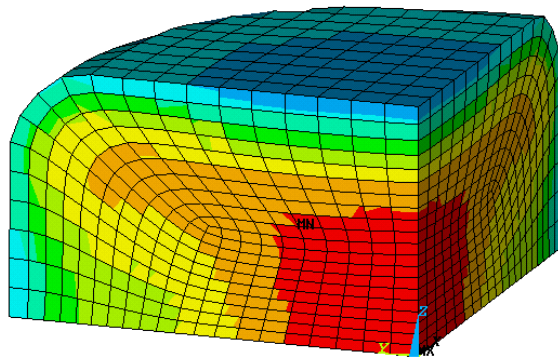


Рис. 5. Распределение эквивалентной пластической деформации

Численная диаграмма деформирования фрагмента гранулированного слоя вдоль оси  $Z$  в квазистатическом режиме нагружения показана черным цветом на рис. 6. Диаграмма связывает средние напряжения с деформацией фрагмента. Вычисление средних напряжений проводилось по формуле:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V_{c.cell}} \sum_e \sigma_{ij}^e V_c^e,$$

где (...) обозначает среднее значение;  $V_{c.all}$  - текущий объем деформируемой области, равный  $R^2 \cdot (R - U_z)$ ;  $U_z$  - сме-

Численное моделирование квазистатических процессов деформирования пористого слоя из свинцовых шариков проводилось в вычислительной системе ANSYS v17.2. Моделирование проводилось методом конечных элементов. Для моделирования деформирования кубической упаковки ввиду симметрии достаточно 1/8 шарика. Численная конечно-элементная модель показана на рис. 3, сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления вертикальной оси  $Z$ , до перемещения 0,5 мм (половина радиуса шарика  $R$ ). Для построения конечно-элементной (КЭ) модели использовался 20 узловой КЭ второго порядка SOLID185 с сокращенным (2Ч2Ч2) интегрированием. Объемная модель шарика состояла из 2000 КЭ. Для описания поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с кинематическим упрочнением. Нелинейная диаграмма деформирования свинца рис. 4 бралась из [10] с пределом текучести  $\sigma_T = 5$  МПа. Распределение эквивалентной пластической деформации показано на рис. 5.

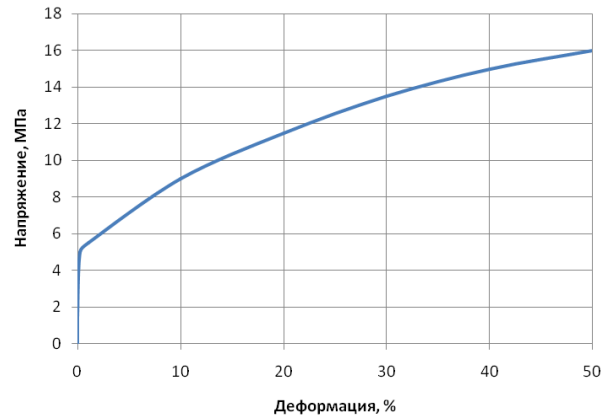


Рис. 4. Диаграмма деформирования свинца

ELEMENT SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =200  
 TIME=.8  
 EPPLQV (NOAVG)  
 Power Graphics  
 EFACET=1  
 DMX = .398063  
 SMN = .015541  
 SMX = .545704  
 .015541  
 .074448  
 .133355  
 .192262  
 .251169  
 .310076  
 .368983  
 .42789  
 .486797  
 .545704

щение вертикальной плоскости;  $\sigma_{ij}^e$  - напряжения в конечном элементе;  $V_c^e$  - текущий объем конечного элемента.

Задача динамики решалась также в ANSYS v.17.2 по неявной схеме Ньюмарка с автоматическим выбором шага. Начальная величина шага по времени 0,1 мкс, максимально допустимая - 20 мкс. Демпфирование по Релею  $\alpha = \beta = 0,01$ . Нагружение в динамическом режиме производилось плоскостью, равномерно двигающейся со скоростью 1,1 м/с в течение интервала времени  $T = 0,4$  мс. Длительность импульса соответствовала времени нагружения образца гранулированного слоя в экспериментальных исследова-

дованиях [7]. Амплитуда скорости выбиралась с целью получить величины деформации фрагмента слоя до 0,43. Моделировались два варианта динамического нагружения симметричной ячейки слоя. Первый вариант рассчитывался с квазистатической диаграммой деформирования свинца (рис. 4), той же самой, как и при статическом режиме нагружения. Вторым вариантом - с динамической диаграммой деформирования свинца, она была получена увеличением предела текучести в 1,5 раза с тем же модулем упругости по рекомендациям [11], учитывающим влияние скорости деформации. В динамических экспериментах [7] скорость деформации была порядка  $1000 \text{ с}^{-1}$ . Расчетные распределения динамических пластических деформаций симметричного фрагмента подобны распределениям для квазистатической задачи (рис. 5). На рис. 6 изображены кривые зависимости усредненного напряжения от деформации по оси нагружения Z: красная кривая – численная

кривая полученная при динамическом моделировании с использованием динамической диаграммы свинца, синяя – численная кривая полученная при динамическом моделировании с использованием статической диаграммы материала, черная – кривая, полученная при статическом режиме нагружения. Параметры усреднены по объему симметричного фрагмента гранулированной среды. Видно, что динамические кривые располагаются значительно выше, чем статическая, что иллюстрирует влияние скорости нагружения в динамическом режиме. Похожее расположение кривых получается и при экспериментальных испытаниях (рис. 1). Использование динамической диаграммы деформирования свинца в динамическом режиме нагружения (красная кривая) также дает заметное отличие в динамическом поведении пористой среды с использованием квазистатической диаграммы свинца (синяя кривая).

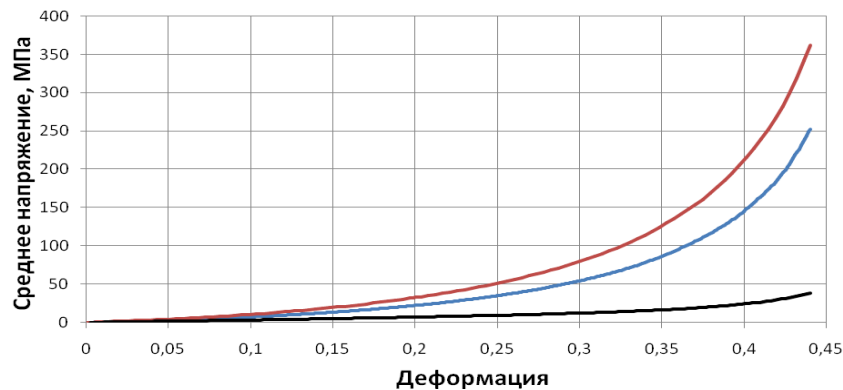


Рис. 6. Численные диаграммы деформирования

### Заключение

Численным моделированием динамического и квазистатического сжатия симметричного фрагмента пористого гранулированного слоя из свинцовых шариков показано, что существенное влияние на отличие поведения статических и динамических диаграмм деформирования пористого слоя оказывают два основных фактора: ограниченное время действия нагружающего импульса в динамическом

режиме и отличие динамической диаграммы деформирования базового материала (свинца при высокой скорости деформации) от статической диаграммы.

Для моделирования использовался Ansys v.17.2. Лицензия ANSYS Academic Research, Customer #623640.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ, проекты № 17-308-50038 мол\_нр, № 18-38-00157 мол\_а.

### Литература:

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов // СПб.: ООО «Издательство «Полигон». 2002. 272 с.
2. Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 79-84.
3. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М. Передача ударно-волновой нагрузки насыпными средами // Прикладная механика и техническая физика. 1988. № 2. С. 115-121.
4. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчеев С.Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 4. С. 87-96.
5. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. №1. С. 132-142.
6. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А. Деформационные свойства насыпного слоя из свинцовых шариков // Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. № 4. С. 413-424.
7. Bragov A.M., Konstantinov A.U., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Experimental study of deformation properties of a bulk layer from plumbum balls under dynamic and quasistatic loading. PNRPU Mechanics Bulletin, 2017, no. 4, pp. 16-27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02
8. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. Int.J. of Impact Engineering, 1995, no. 16(2), pp. 321-330.
9. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters // International Journal of Multiphase Flow. 2001. V. 27 (4). pp. 617-634.
10. Туманов А.Т. и др. Конструкционные материалы. Издательство «Советская энциклопедия». 1965. Т. 2. с. 186.
11. Мерзиевский Л.А., Палецкий А.В. Расчет диаграмм динамического деформирования материалов и сплавов. Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 3. с. 85-96.